

## 비원형 선삭을 위한 고속 위치결정 장치와 가공 데이터 작성 시스템에 관한 연구

\*김경석, \*\*김성식, \*\*\*김형택, \*\*\*\*송충현

### A Study on High Speed Positioning Device and Cutting Data Producing System for Noncircular Cutting with CNC Lathe

\*조선대학교 기계공학부, \*\*목포과학대학 기계설계학과, \*\*\*조선대 대학원

#### ABSTRACT

Control system for cutting piston used in vehicle that is one of the 3D shape cutting using CNC lathe is presented. In order to cut the hybrid piston shape using CNC lathe, defined piston shape and change into machine code. The control software was developed for the high speed piston shape cutting. In this paper, the performance of this software was evaluated practically.

As a result, the evaluated cutting precision was quantitatively compared with theoretical precision. Also the productivity and the quality by using CNC lathe with control software were evaluated those by using profiling.

Key Word : CNC Lathe(CNC 선반), Linear Motor(리니어 모터), Piston(피스톤), Normal Ovality(정규타원), Double Ovality(2중타원), Threeply Ovality(3중타원)

#### 1. 서 론

기계가공(Machining)중에서 가장 기본적인 것은 선삭가공이며, 이러한 가공은 선반에 의해 행하여진다. 선삭 가공에 CNC 선반이 활용되어서 생산품질, 단위시간당의 생산수량, 납기의 확보가 매우 용이하게 되었으며 생산활동이 자연스럽게 진행되어질 수 있다.

본 연구에서 다루고자 하는 CNC 선반에 의한 피스톤 등과 같은 타원형상을 가공하기 위해서는 공구이송축성능이 우선되어야 하고 이에 따라 피스톤의 품질과 생산성이 좌우된다.

특히, 자동차용 피스톤은 3차원의 복잡한 형상(Ovality, Profile)으로 설계되고, 수많은 시험을 통한 개선으로 형상이 계속 변화됨에 따라 종래의 모방모델을 사용한 모방절삭 방식에서 탈피하여 CNC 선반에 의한 프로그램 절삭을 하게 되었

으며, 품질은 물론 생산성 향상이 가능해졌다."

이 생산성은 주축인 C축의 회전에 동기한 절삭 공구축의 고속 이송 및 고속 위치결정을 행하는 제어기구의 개발에 의존하고, 위치결정기구는 고속응답성과 절삭력에 견딜 수 있는 충분한 힘을 필요로 한다.<sup>2~4)</sup> 한편, 이송축의 구동방식에 대한 연구는 1987년 일본 Izumi Industries, Ltd.에서 Minoru Tanaka에 의해 개발된 전자흡인력 방식 외에 전기유압서보 방식, 서보모터와 불나사 방식, 압전 액츄에이터 방식 등이 연구되었다.

전자흡인력 방식은 변위가 작고 비선형성이며, 전기유압서보 방식은 장치가 대형이고 저응답성으로 속도에 한계가 있다. 또한, 서보모터와 불나사 방식 또한 저응답성이고 불나사의 나사부와 너트부의 마멸로 백래쉬가 있으며, 압전 액츄에이터 방식은 고정도, 고응답성을 가지나 저출력인 단점이 있다. 이러한 단점들을 개선하여 성능을 향상시키기 위한 목적으로 많은 연구와 개발

이 이루어지고 있으나 실용화 단계에는 아직 100Hz에 그치고 있다.

이에 반해, 고속 위치결정 장치로서 리니어 모터(Linear Motor)를 이용하여 구동시키는 방법은 1841년 영국의 교통시스템에 실용화 된 이래 최근 각종 자동화 기기를 중심으로 응용되고 있으며 그 응용면에서 반응용과 위치결정용으로 크게 나눌 수 있다. 고속, 고정밀도의 위치결정을 위한 기구로 채용하면 중간의 기계적 요소를 채용하지 않고 장치를 직접 구동할 수 있다. 따라서, 액츄에이터와 비교해 볼 때 탄성변형이 없고, 백래쉬가 없으며, 고속, 고가감속, 추력의 확장성, 단순한 구조, 저소음등의 장점을 가지고 있어서, 원리 및 구조적으로 직접구동(Direct Drive)기능을 발휘하고 있다. 그러나 기계적 운동변환 기구를 사용하지 않고 기계적으로 직접 구동하는 경우에는 추력, 질량, 제어성 및 경제성 등에 과제가 남아 있고 직선운동에서는 특히, 리니어 모터 그 자체와 이것을 포함한 시스템으로서의 고성능화가 절실히 요구된다. 성능을 향상시키기 위해서는 용도에 맞는 모델을 선택하고, 경량이면서도 강성이 높은 프레임의 설계, 저중심 설계, 중력축의 밸런스, 마찰을 작게 하는 등의 조건이 있다. 또한 복잡한 3차원의 피스톤 형상을 정의하고 기계어로 변환 후 고속으로 전송 및 가공할 수 있는 제어시스템의 개발이 필수라 할 수 있다.<sup>9~10)</sup>

본 연구에서는 피스톤가공의 고속화를 행할 수 있는 고성능 위치결정장치를 구현하기 위하여 리니어 브러시리스 직류모터(Linear Brushless DC Motor)를 사용하고 이를 운전하기 위한 제어시스템과 응답특성을 제시하고자 한다.

## 2. 피스톤의 형상

피스톤의 단면 형상을 타원(Oval)으로 가공하는 주된 이유는 피스톤과 라이너의 접촉면이 효과적으로 소착 되지 않고 원활한 상하 운동을 할 수 있게 하는 것이다. 타원형상이 커서 피스톤 스킵트(Skirt) 접촉면이 넓어지면 소음은 줄어드나 소착의 확률이 높아지고, 타원의 형상이 작아 접촉면이 좁아지면 엔진 소음이 커진다. 그러므로, 적당한 크기의 타원 형상으로 엔진의 소음을 적게

하고 최적의 출력을 얻도록 해야 하므로 여러 가지 조건에 대해서 검토되고 있다. 기본적으로 편이 들어가는 방향과 편 직각 방향의 살 두께의 차이로 엔진 운전 시 형상이 달라지기 때문이지만, 이 밖에 피스톤의 Thrust와 Antitrust의 방향, 60° 방향으로 형성되는 형상의 충분한 공간 형상 변형치와 정확한 조립 틈새, 박스 피스톤의 45° 방향이 저하되는 치수, 엔진 유회유의 미끄럼 상태 등에 대해 계속 연구되어 오고 있다. 현존하고 있는 타원 형상은 정규타원(Normal Oval), (+) 2중타원(Double Oval), (-)2중타원, 3중타원(Threeply Oval)등이 있다. 또한 이러한 형상은 각社별로 연구가 거듭된 경험치이고 본 연구에서는 독일 MAHLE 社의 경험치를 바탕으로 하였다.

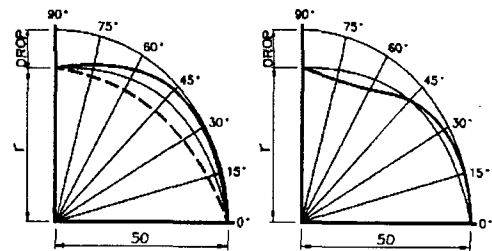


Fig. 1 Shape of Piston(Normal, Double, Threeply)

Fig. 1.에 직경  $\varnothing 100$  mm인 피스톤의 정규타원, 2중타원, 3중타원의 개략적인 형상을 그림으로 보여주고 있다. 여기서, 타원 형상을 수식으로 나타내면 정규타원  $y$ 는

$$y = \frac{H}{4} (1 - \cos 2\theta) \quad (1)$$

이다. 여기서,  $H$ 는 타원량, 즉 장경과 단경의 차로써 장경은 편 직각 방향의 직경값, 단경은 편 방향의 직경 값이고  $\theta$ 는 피스톤 형상을 이루는 각도이다. 더블 타원은 정규타원을 기준으로 45° 방향 공간을 확보하는 형상으로써  $y_1$ 은

$$y_1 = \frac{H}{4} (1 - \cos 2\theta) \pm \frac{U}{2} (1 - \cos 4\theta) \quad (2)$$

이다. 여기서,  $U$ 는 2중 타원량을 나타낸다.

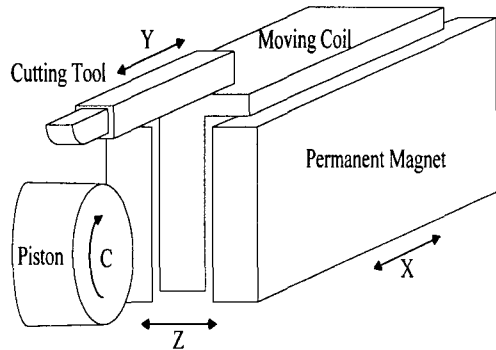


Fig. 2 Schematic diagram of piston turning machine

3중 타원은 30° 와 60° 방향의 공간을 확보하는 형상으로써  $y_2$ 는

$$y_2 = \frac{H+U}{4}(1 - \cos 2\theta) - \frac{U}{4}(1 - \cos 6\theta) \quad (3)$$

이다.

Fig. 2는 CNC 선반에 의해 피스톤을 가공할 때의 각 축의 개략도를 나타내고 있다. 여기서, C 축은 피스톤을 회전시키는 주축이고, X 축은 피스톤의 크기에 따라 개략적인 공구의 위치결정을 행하고, Z 축은 C 축의 회전에 동기 하여 길이 방향의 절삭을 행하며, Y 축은 미소량 만큼 공구를 고속으로 이동시키면서 C 축의 회전에 동기 하여 절삭을 행하는 축이다. 즉 C-Z 축의 동기제어로 Profile을 가공하고, C-Y 축의 동기제어로 단면 방향의 형상인 Ovality를 가공하게 된다. 피스톤의 타원형상을 가공하기 위해서는 C-Z-Y 축의 동기제어가 중요하며, 특히, 주축 1회전 당 Y축이 2회 왕복 이송해야 한다. 따라서 C축의 회전속도를  $N$  (rpm), Y축의 왕복주파수를  $f_y$  (Hz)라 하면 식 (4)와 같은 관계가 성립한다.

$$N = 30 f_y \quad (\text{rpm}) \quad (4)$$

Fig. 3은 피스톤 횡단면의 타원형상을 보여주고 있다. 여기서  $\theta$ (rad)는 회전각도를 나타내고  $a$ ,  $b$ 는 각각 타원형상의 장축과 단축을 나타낸다.

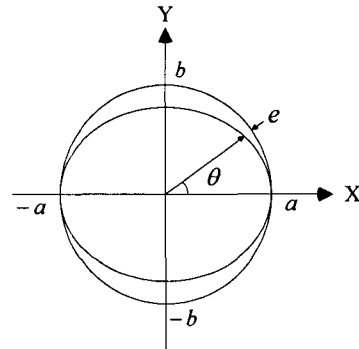


Fig. 3 The oval shape of piston

직교 좌표 상에서의 일반적인 타원의 공식은 다음과 같다

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

식 (5)를 극좌표상에서 표시하면 다음과 같다.

$$x = r \cos \theta \quad (6)$$

$$y = r \sin \theta$$

$$\therefore r = \frac{ab}{\sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2}} \quad (7)$$

따라서 피스톤의 가공 시 이송장치의 이송거리  $e$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e &= a - r \\ &= a \left[ 1 - \frac{b}{\sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2}} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

장축  $a = 50$  mm이고, 단축  $b = 49.75$  mm인 피스톤 가공에서 공구의 이송궤적을 C축 회전각도에 대해서 도시하면 Fig. 4와 같다.

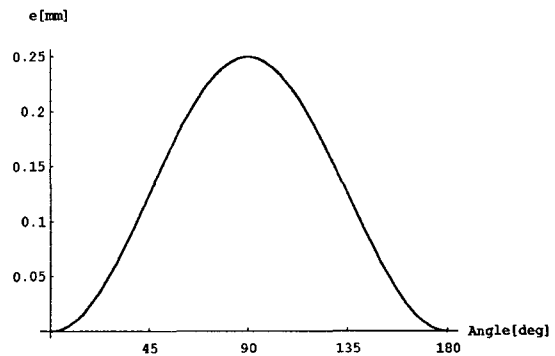


Fig. 4 The tool feed trajectory

$e$ 를 시간  $t$ 에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$e = a \left[ 1 - \frac{b}{\sqrt{(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2}} \right] \quad (9)$$

여기서,  $\omega_c$ 는  $C$ 축의 각속도를 나타낸다.

따라서  $e$ 의 속도, 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_e = \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c \sin \omega_c t \cos \omega_c t}{[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

$$a_e = \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c^2 (a^2 - b^2)(\cos 4\omega_c t - 5)}{8[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{5}{2}}} + \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c^2 \times 4(a^2 + b^2)\cos 2\omega_c t}{8[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{5}{2}}} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 이용하여 타원량  $\varnothing 0.5$  mm를 가공하기 위한 절삭공구의 이송궤적의 속도, 가속도를 이송주파수로 분류하여  $C$ 축 회전각도에 대해서 도시하면 Fig. 5, 6과 같다.

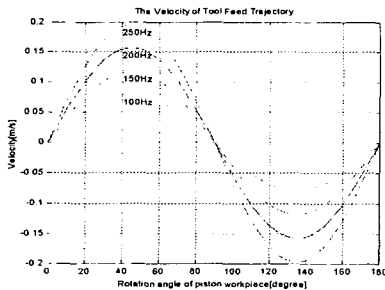


Fig. 5 The velocity of tool feed trajectory,  $V_e$

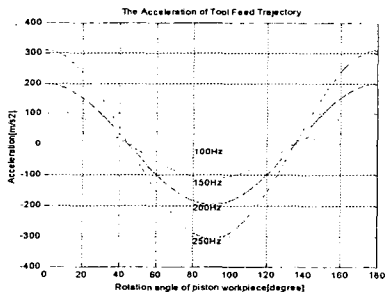


Fig. 6 The acceleration of tool feed trajectory,  $a_e$

한편, 식 (8)에서 타원량이  $\varnothing 0.5$  mm로 일정한 경우 장축  $a$ 의 변화에 따른 이송궤적  $e$ 의 변화를  $a = 50$  mm일 때의 이송궤적을 기준으로 하여 도시하면 Fig. 7과 같다.

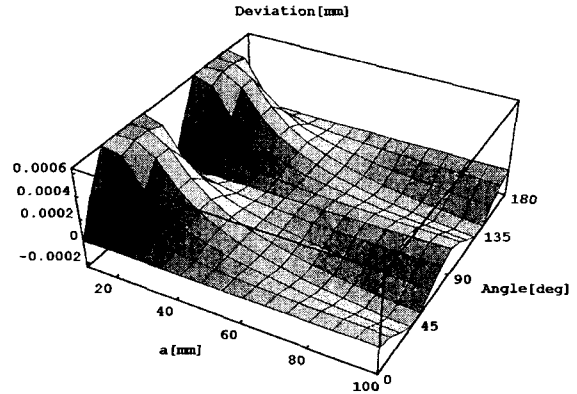


Fig. 7 The variation of tool feed trajectory with respect to position diameter

이상으로부터 피스톤 타원량과  $C$ 축의 회전수가 일정할 때, 가공 피스톤의 직경 변화에 따른 이송궤적  $e$ 의 변화는  $0.8 \mu\text{m}$  정도로 미소하다고 할 수 있다. Table 1에는 이송주파수에 대하여 요구되는 최대속도 및 가속도를 정리한 것으로 주축회전수 7500 rpm(250 Hz)을 목표로 할 때 32G 이상의 가속도가 요구됨을 알 수 있다.

Table. 1 The maximum velocity and acceleration of tool feed trajectory( $\varnothing 0.5$  mm)

Feed frequency[Hz]	100	150	200	250
velocity[m/s]	0.0785	0.1178	0.1571	0.1963
Acceleration[m/s <sup>2</sup> ]	49.72	111.87	198.88	310.75

### 3. 피스톤 가공 소프트웨어

일반적으로 피스톤의 형상은 도면상의 단편적인 정보로써 타원의 종류, 장경과 단경의 차(Ovality), 길이방향의 기준 원으로부터의 편차(Profile) 등으로만 표현된다. 모방절삭 방식에서는 마스터 캠에 의해 가공을 하므로 별도의 프로그램은 필요로 하지 않았다. 그러나 CNC 선반에서는 절삭조건에 맞추어 피스톤의 형상을 가공하

기 위한 프로그램이 필요하다. C 축의 분할각도와 각 축의 이동량이 한 블록이므로 도면상의 정보에서 수십만 블록의 가공 프로그램 데이터를 손으로 계산하여 입력한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 피스톤의 데이터를 피스톤 가공 프로그램으로 변환시켜 주는 소프트웨어를 구성하여 일반 퍼스널 컴퓨터에서 운전이 가능하도록 하였다. 퍼스널 컴퓨터에서 NC의 리모트버퍼에 고속 전송하고, 고속 가공할 수 있으며 전체적인 운전을 할 수 있는 초기화면을 Fig. 8에 나타내고 피스톤의 형상을 정의한 후 각각의 형상을 확인할 수 있는 내용을 Fig. 9에 나타냈으며, 정의된 형상의 입체도를 Fig. 10에 나타내었다.

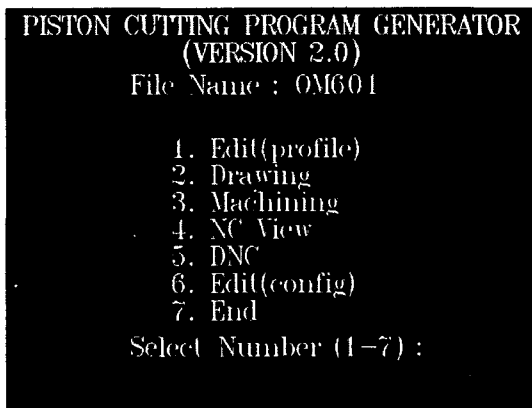


Fig. 8 Windows of display input

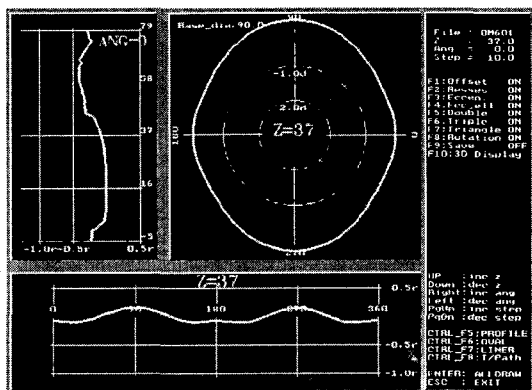


Fig. 9 Windows of graphic output

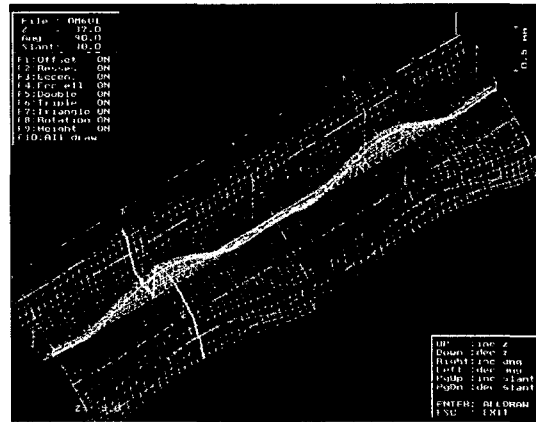


Fig. 10 Windows of graphic output(3D shape)

#### 4. 서보계의 구성

시스템의 정밀도를 높이고 고속화를 위하여 디지털 서보앰프와 디지털 제어기를 사용하였다. 디지털 서보앰프는 전류 제어를 위해 PI 제어기를 사용하며 샘플링 주파수가 높을수록 전류의 리플 현상이 줄고, 그에 따라 모터의 발열이 방지되므로 샘플링 주파수를 24kHz (41.67 μs)로 설정하였다. 디지털 제어기는 기본적으로 PID 제어기법을 사용하며 최대 6kHz(166 μs)의 샘플링 주파수를 가진다.

Fig. 11은 제어시스템의 개략도이다.

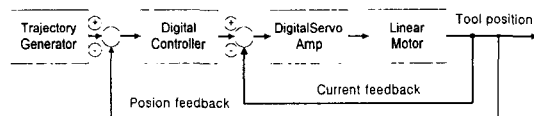


Fig. 11 the servo system of tool feed system

피스톤 타원 형상 가공을 위해서는 리니어 모터의 위치 제어뿐만 아니라 위상 오차를 최소화하는 것이 중요하다. 시스템의 안정성을 유지하면서 고속, 고정밀도의 위치결정과 위상오차를 보상해 주기 위해 다음과 같은 PID 제어기를 사용하였다.

$$D(z) = Kp + Kd \frac{(z-1)}{z \cdot ts} + Ki \frac{z \cdot ts}{z-1} \quad (12)$$

따라서, 전체 시스템의 페루프 전달함수  $G(z)$ 는

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(z) = \frac{D(z) Gp(z)}{1 + D(z) Gp(z)} \quad (13)$$

서보앰프 모터 전달함수  $Gp(z)$ 는 제 2형 시스템이므로 기준 입력에 대한 정상상태 오차는 어느 정도 만족된다고 할 수 있다. 고주파수 입력에 대해서 공구 이송 위치오차와 위상오차를 줄이기 위해서는 페루프 전달함수  $G(z)$ 의 주파수 대역폭을 넓힐 필요가 있다. 그러나 여기에 시스템의 안정성이 고려되어야 하므로 시스템의 성능과 안정성 사이에 적절한 보상이 필요하다. 따라서, 시뮬레이션을 통하여 가장 응답 특성이 좋은  $Kd=178.1984$ ,  $Kp=5.649 \times 10^4$ ,  $Ki=1.0314 \times 10^6$ 를 취했다.

고속 공구 이송축을 포함한 각 축의 제어시스템의 개략도는 Fig. 12와 같다.

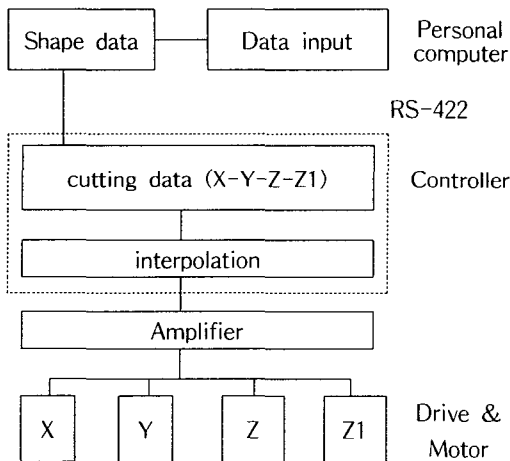


Fig. 12 Schematic diagram of control system

### 5. 실험 결과 및 고찰

시스템의 모델링 및 제어를 설계하여 피스톤 가공 시 발생되는 절삭력에 의한 외란을 무시하고  $\varnothing 0.5$  mm 타원 형상 궤적의 추종성을 시뮬레이션을 통하여 검토한 바 있다. 그 결과 50 Hz, 70 Hz까지는 비교적 양호하였으나 100 Hz 이상에서는 위상 오차가 실제 가공형상에 영향을 미칠 정도로 심하게 나타났다. 또한 자동차용 피스톤의 타원량은 보통 0.1 ~ 1 mm 이고, 하나

의 피스톤에 각각의 위치별로 형상이 변하며, Eccentricity, Offset, Recess 등의 형상을 포함하는 경우가 있기 때문에 공구이송장치는 각각 추종 능력이 달라지게 된다. 따라서, 실제 피스톤의 형상을 정의하여 가공할 수 있는 프로그램으로 추종능력의 한계를 실험하였다. 실험의 한계는 입력치의 형상대비 위상차  $1^\circ$  와 각 위치에서 0.015 mm의 오차로 하였고, 타원량을 각각  $\varnothing 0.1$ ,  $\varnothing 1$ ,  $\varnothing 5$  mm로 하여 실험한 결과 추종능력의 한계는  $\varnothing 0.1$  mm에서 160 Hz,  $\varnothing 1$  mm에서 100 Hz,  $\varnothing 5$  mm에서 60 Hz까지 가능함을 알 수 있었다. Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15는 각각 타원량  $\varnothing 0.1$ ,  $\varnothing 1$ ,  $\varnothing 5$  mm의 결과이고, Fig 16은 타원량에 따른 공구 이송장치의 추종범위를 나타낸다.

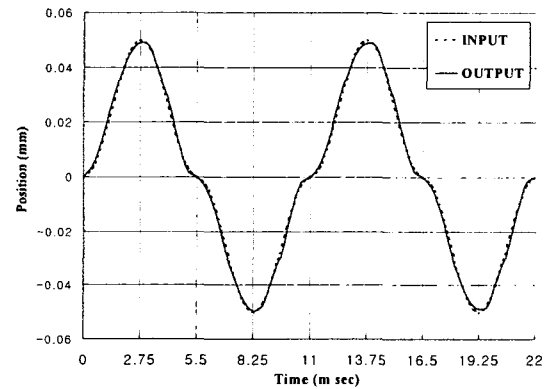


Fig. 13 Measuring result of ovality trajectory ( $\varnothing 0.1$  mm - 160 Hz)

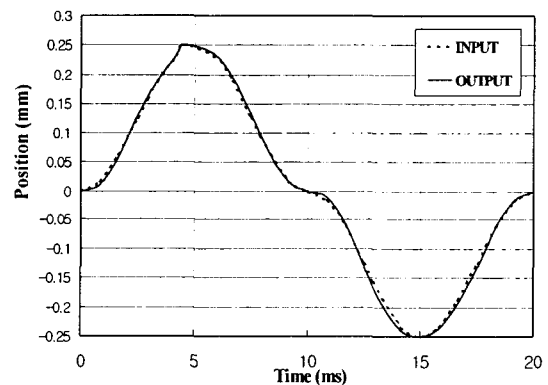


Fig. 14 Measuring result of ovality trajectory ( $\varnothing 1$  mm - 100 Hz)

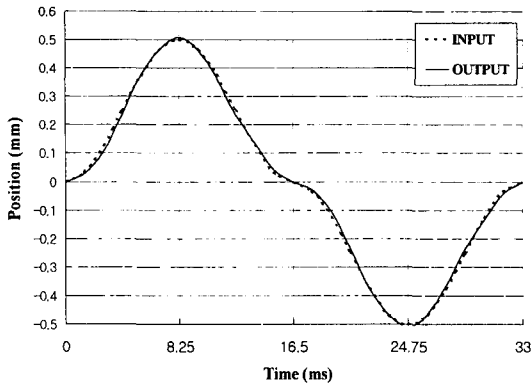


Fig. 15 Measuring result of ovality trajectory (Ø5 mm - 60 Hz)

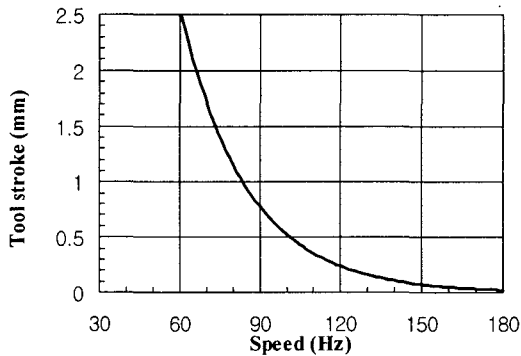


Fig. 16 Tool stroke vs. Response

## 6. 결 론

본 연구에서는 자동차 엔진에 쓰이는 피스톤의 형상 가공을 위하여 피스톤 가공 궤적을 고려한 고속 고정밀 공구 이송장치를 포함한 CNC 선반을 운전하여 그 응답성을 평가하였다. 입력 데이터와 공구의 거동으로 실험하여 Ø0.1 mm - 160 Hz, Ø1 mm - 100 Hz, Ø5 mm - 60 Hz로 모방절삭과 종래 CNC 피스톤 가공기의 절삭 품질은 물론 생산성에 있어서도 향상됨을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 “1999~2000년도 한국과학재단 지정 조선대학교 지역 협력 연구센터인 수송기계 부품

자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.”

## 참고문헌

1. 山本英繼, “고성능화. 고신뢰화에 대응한 기계 장치의 열 대책 설계”, 機械設計技術, Vol. 7, No. 4, pp. 41-45, 1992.
2. Toshiro Higuchi, Tomomi Yamaguchi and Minoru Tanaka, “Development of a High Speed Non-circular Machining NC-lathe for Cutting a Piston-head of a Reciprocating Engine by use of a New Servomechanism Actuated by Electromagnetic Attractive Force”, J. JSPE, ピストン外形 加工用 高速 CNC 旋盤の開発”, 内燃機関, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
3. 김경석, 김성식의 4인, “피스톤 가공용 CNC 선반 HOT-1000 개발에 관한 연구”, 한국공작 기계 기술학회지, 제 5권, 제 2호, pp. 90-97, 1996.
4. 김경석, 김성식 외 5인, “비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회, Vol. 13, No. 4, pp. 152-162, 1996.
5. MAHLE GmbH, “NCF1 Betriebsanleitung”, Manual, 1993.4. Bartos, F. J., “Linear Motors and Control take a “direct” route to top performance”, Control Engineering, Vol. 44, No. 4, pp. 90-2, 94, 96, 98, 100
6. ETEL S.A “DSA2-PL User’s Manual”, 1997.
7. Trilogy Systems Corp., “Linear Motors for Precision Motion Control”,
8. HIEDENHI, Linear Encoder Technical books & Catalogue, Ver 1997.
9. 東京精密, “眞良度 測定機 ロンコム40A 取扱説明書 & 技術資料”, No. 84-0025B
10. 서준호, 민승환, 김성식, 이선규, “리니어 모터를 이용한 고속 비진원 가공용 공구이송장치의 특성연구”, 한국정밀공학회 추계논문집, pp. 985-990, 1997.